

УДК 532.517

Расчетное моделирование движения теплоносителя в сложных криволинейных каналах*

О.В. Митрофанова^{1,2}, А.Ш. Байрамуков¹

¹ *Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия*

² *Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Москва, 123182, Россия
e-mail: omitr@yandex.ru, bayramuks@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.03.2019

После доработки 20.03.2019

Принята к публикации 24.03.2019

Проведены расчетно-теоретические исследования по моделированию процессов гидродинамики в элементах теплогидравлического тракта судовой ядерной энергетической установки. В качестве объектов моделирования выбраны типовые геометрические элементы трубной системы компенсации давления. Выбор расчетной модели был обоснован путем качественного и количественного сравнения различных моделей турбулентности с результатами экспериментальных исследований. Целью проводимых исследований является разработка принципов физико-математического моделирования процессов гидродинамики и теплообмена, влияющих на ресурс и надежность работы ледокольных ядерных энергетических установок.

Ключевые слова: гидродинамика, вихревые структуры, закрутка потока, ядерные энергетические установки, безопасность, численное моделирование процессов гидродинамики, компенсатор давления, трубная система.

Введение

Примеры течения теплоносителя по криволинейным каналам встречаются практически во всех элементах ядерных энергетических установок. Наличие изгибов создает особые условия для внутреннего течения теплоносителя, что связано с действием центробежных сил. Неравномерное распределение центробежных сил по поперечному сечению канала приводит к возникновению поперечной циркуляции и способствует появлению локальных вихреобразований или даже формированию закрученного потока. В данном случае, согласно работе [1], под закрученным потоком понимается ограниченное поверхностью канала внутреннее вращательно-поступательное вихревое течение жидкости, характеризующееся отличной от нуля циркуля-

цией скорости в масштабе поперечного сечения канала.

В настоящей работе исследования проводились с целью выявления особенностей течения теплоносителя в криволинейных каналах судовых ядерных энергетических установках (ЯЭУ), подверженных частым теплогидравлическим нагрузкам [2].

1. Физические особенности внутренних криволинейных и закрученных течений

Теоретическая работа В.-Р. Дина [3] (1928 г.) была первой работой, которая продемонстрировала движение, вызванное кривизной канала. После прохождения изогнутых участков трубопровода течение приобретало вихревой характер, а именно, оно представляло собой пары стационарных вихрей с противоположной закруткой, расположенные симметрично относительно плоскости симметрии канала. Классические вихри Дина представлены на рис. 1.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант РФФИ 19-08-00223-а и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.а03.21.0005).

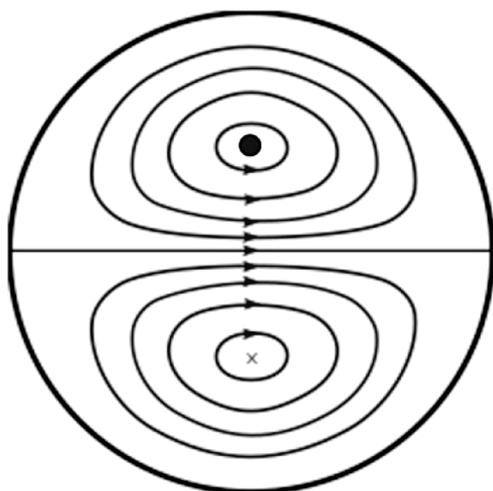


Рис. 1. Классический вид вихрей Дина

Интенсивность вихрей Дина оценивается безразмерным числом Дина:

$$De = Re_D \sqrt{\frac{D}{2R_c}}, \quad (1)$$

где D – внутренний диаметр трубы, м; R_c – радиус кривизны канала, м; $Re_D = uD/\nu$ – число Рейнольдса; u – средняя расходная скорость, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

В центральной части сечения жидкость перемещается от оси изгиба трубы, а около верхней и нижней поверхностей – к оси изгиба. Одновременно частицы движутся вдоль оси трубы и, следовательно, их траектории имеют форму винтовой линии, кривизна которой увеличивается с уменьшением радиуса изгиба канала. В змеевиках развитое винтовое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа, а в коротких криволинейных каналах-поворотах оно может и не достичь развитой формы. За поворотом обычно располагается прямолинейный канал, в котором вторичные течения могут устойчиво сохраняться на длине до 50 калибров.

После открытия В. Дина появилось большое количество научных работ, посвященных исследованию особенностей течения жидкости в

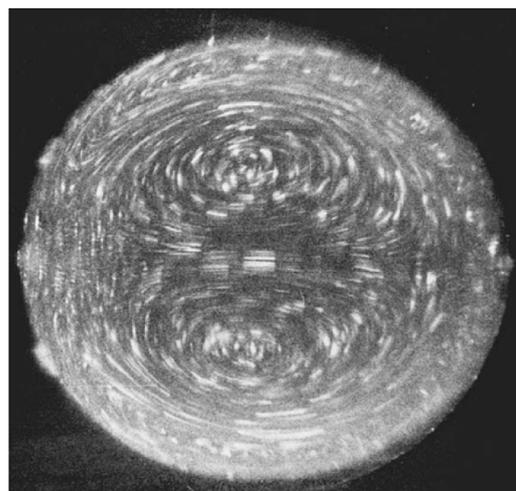


Рис. 2. Контур поля скорости в поперечном сечении изогнутого канала, полученный в экспериментальных исследованиях закрученных течений Бертелсеном (1975) [6]

изогнутых каналах. Результаты дальнейшие исследований были опубликованы Голдштейном (1938) [4], Шлихтингом (1955) [5], Бертелсеном (1975) [6], Вард-Смитом (1980) [7].

Автор работы [8] провел обзор экспериментальных исследований закрученных течений, в котором приводится описание некоторых закономерностей течения жидкости в криволинейных каналах и экспериментальных установок, позволяющих визуализировать структуру течения, как это показано на рис. 2.

2. Верификация выбора расчетной модели

2.1. Геометрия

Обоснование выбора расчетной модели для численных расчетов проводилось путем сравнения результатов физических и вычислительных экспериментов. Для этой цели была выбрана упрощенная геометрия, которая встречается в большинстве экспериментальных работ, а именно, трубопровод с одним изгибом под углом 90°. Геометрическая модель трубы представлена на рис. 3.

Трубопровод состоит из прямолинейных входного и выходного участков протяженностью $50D$ и $25D$ соответственно. Величина относительной кривизны поворота (D/R_c) равна 1.

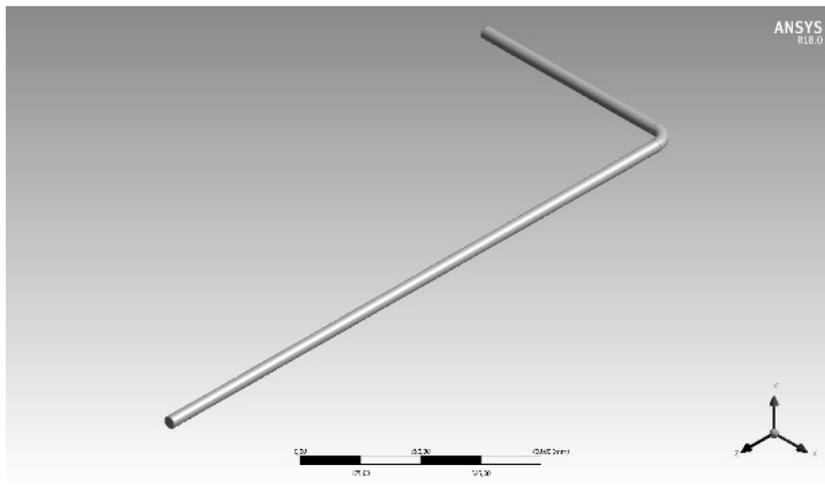


Рис. 3. Геометрия трубопровода

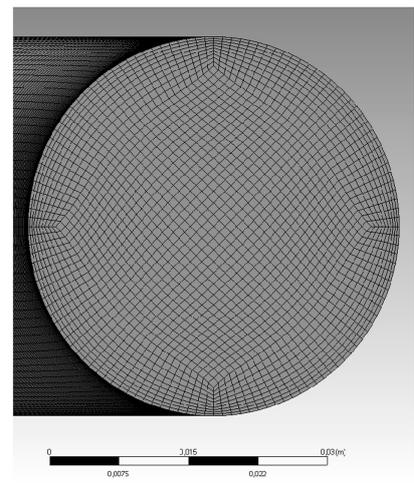


Рис. 4. Поперечный вид сеточной модели

2.2. Расчетная сетка и постановка задачи

Сеточная модель была построена при помощи строителя ANSYS Meshing. Расчетная область была разбита на 9 501 696 элементов. Элементы представляли собой призмы с максимальным линейным размером не более 1 мм. Пристеночная область толщиной 3 мм состояла из 10 слоев, в которых толщина каждого последующего меньше толщины предыдущего слоя в 1.1 раза. Поперечное сечение сеточной модели показано на рис. 4.

Рассматривалась стационарная задача с граничными условиями, указанными в табл. 1.

Таблица 1. Граничные условия задачи

Граница	Параметры
Вход	$v = 0.627$ м/с
Выход	$P = 150$ кПа
Стенка	Гладкая стенка, условие прилипания
Объем	$t = 20^\circ\text{C}$, модель турбулентности $k-\omega$ -SST

2.3. Результаты верификации

Сравнение результатов численных расчетов с данными экспериментов, описанными в работе [9], проводилось на основе сопоставления профилей осредненной по времени продольной скорости, нормированной по расходной скорости на различном удалении от поворота. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

В процессе проведения вычислительных экспериментов были получены поля мгновенных значений скоростей в сечениях изогнутого канала, соответствующих условиям экспериментальной работы [9].

В аналогичных точках были построены кривые, полученные в результате численного расчета. Расчетные кривые приведены на рис. 6.

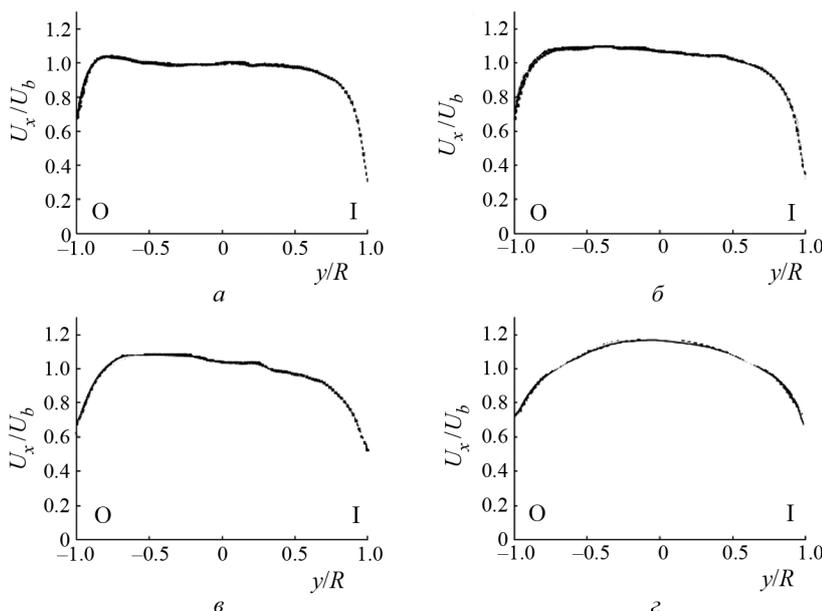


Рис. 5. Отношение осредненной по времени продольной скорости U_x к расходной скорости U_b (U_x/U_b) в сечениях $5D$ (а); $10D$ (б); $20D$ (в); $50D$ (г) после поворота

Профили нормированной скорости U_x/U_b , полученные экспериментально, практически полностью совпадают с профилями скорости, рассчитанной численными методами. Исключением являются графики профиля скорости в сечении на удалении $5D$ от поворота (см. рис. 5, *a* и 6, *a*). Во-первых, различие профилей скорости объясняется тем, что экспериментальные данные, представленные в [9], осредняются во времени, а во-вторых, тем, что метод измерения Particle Image Velocimetry (PIV), применяемый для эмпирического анализа, имел погрешность 5%.

В работе [9] экспериментально были измерены поля скоростей в сечениях до и после изгиба канала. На рис. 7 представлены иллюстрации, характеризующие перестройку профиля скорости и образование застойной области после поворота.

Рис. 8 демонстрирует примеры численных расчетов, предпринятых в настоящей работе, по определению полей скоростей в сечениях, соответствующих условиям экспериментов работы [9] (см. рис. 7).

Сравнение рис. 7 и 8 показывает, что результаты численного расчета практически совпадают с полями скоростей, полученными эмпирически.

Авторами работы [10] было исследовано турбулентное течение в трубопроводе с несколькими изгибами под углом 90° . Была проведена валидация различных моделей турбулентности

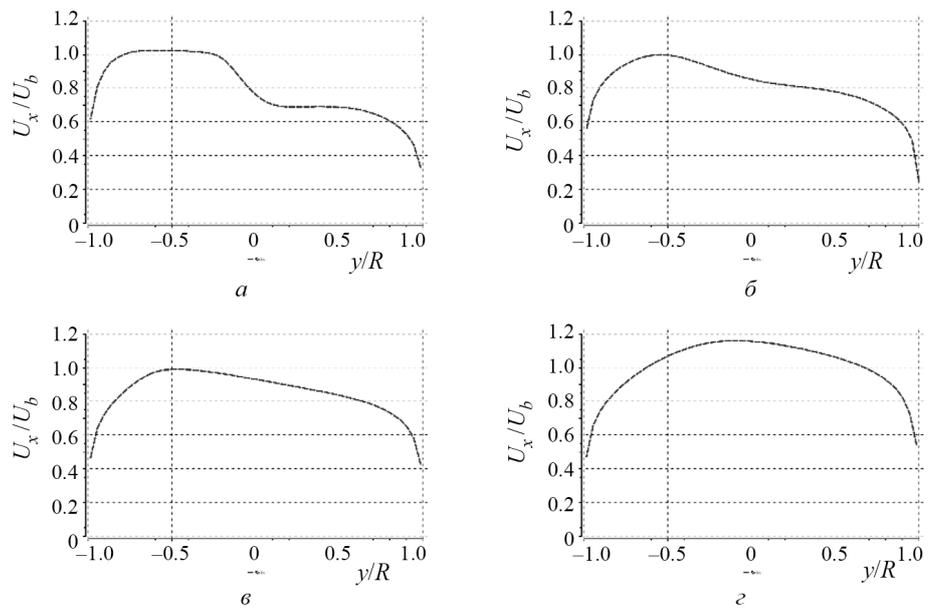


Рис. 6. Результаты расчета мгновенной нормированной продольной скорости по расходной скорости (U_x/U_b) в сечениях $5D$ (*a*); $10D$ (*б*); $20D$ (*в*); $50D$ (*г*) после поворота

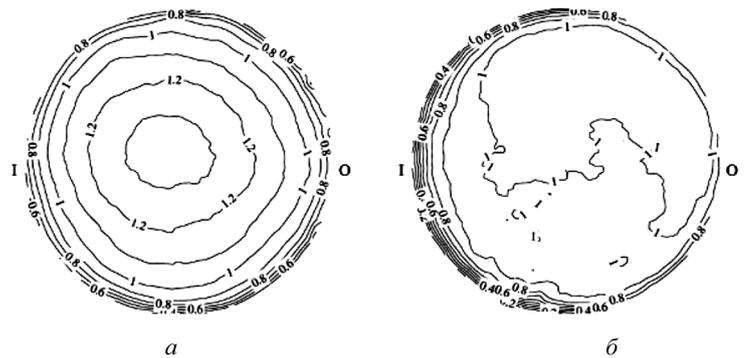


Рис. 7. Результаты экспериментов [9]. Поле продольной скорости, нормированное по расходной скорости, (U_x/U_b) при $Re = 25 \cdot 10^3$ в поперечном сечении $15D$ до поворота (*a*), $5D$ после поворота (*б*)

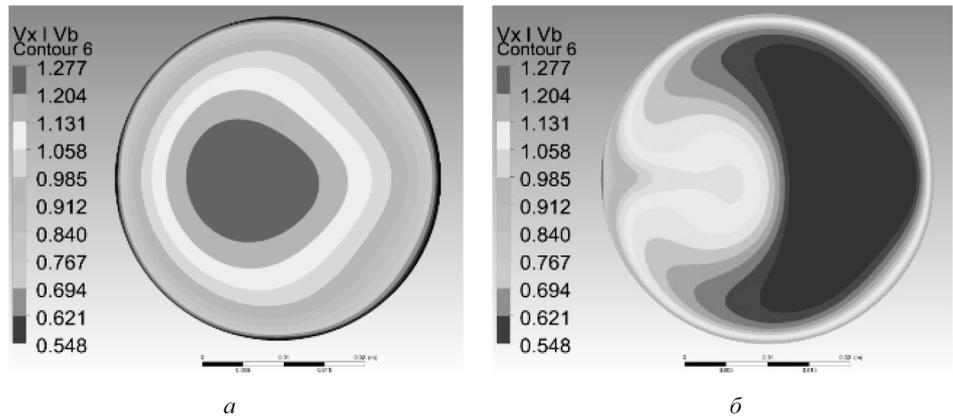


Рис. 8. Результаты расчета. Поле продольной скорости, нормированное по расходной скорости, (U_x/U_b) при $Re = 25 \cdot 10^3$ в поперечном сечении $15D$ до поворота (*a*), $5D$ после поворота (*б*)

по экспериментальным исследованиям Sudo и др. [11]. Авторы работы [10] провели количественную оценку, посчитав количество совпадений, т.е. точек, в которых результаты расчета соответствующей составляющей скорости совпадают с результатами эмпирического исследования с погрешностью не более $\pm 10\%$. Совпадения авторы обозначили «hit», а не-

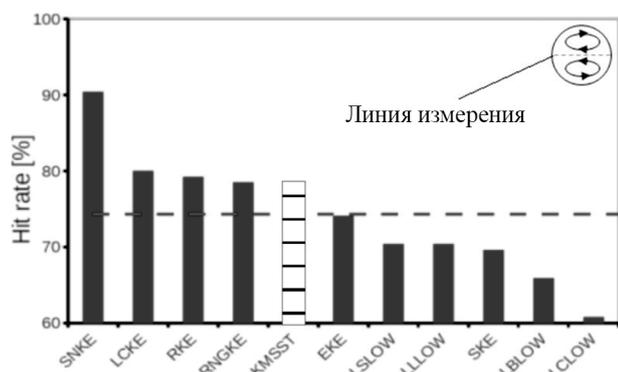


Рис. 9. Количество совпадений продольной составляющей скорости на линии симметрии

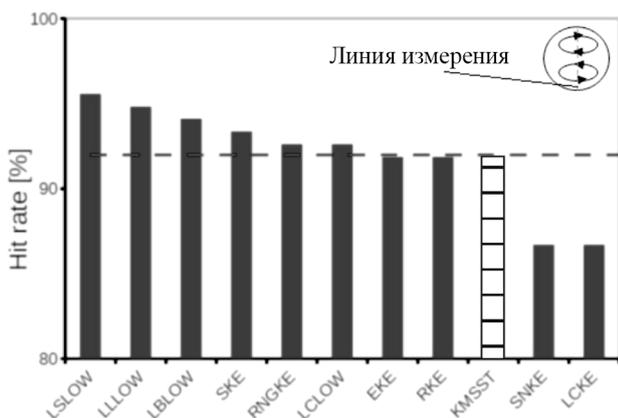


Рис. 10. Количество совпадений продольной составляющей скорости на линии поперечного сечения

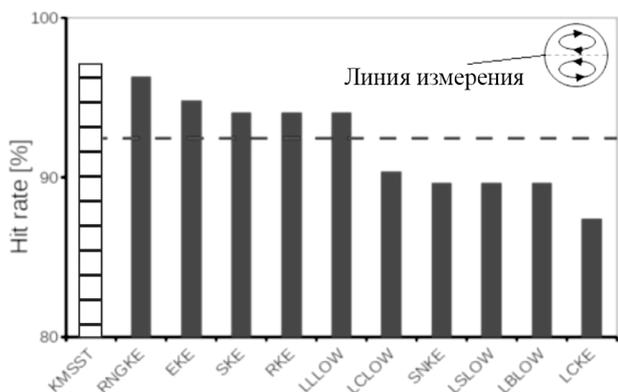


Рис. 11. Количество совпадений поперечной составляющей скорости на линии симметрии

совпадения «miss». Результаты выполненного количественного анализа сведены в диаграммы на рис. 9–11. Пунктирная черта показывает среднее арифметическое количества совпадения для всех рассматриваемых моделей. Первые две диаграммы демонстрируют результаты определения величины продольной составляющей скорости, измеренной в точках по горизонтальной и вертикальной линиям симметрии трубопровода, а на третьей диаграмме приведен анализ поперечной составляющей скорости на горизонтальной линии симметрии трубы.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что сравнимой по качеству с моделью $k-\omega$ -SST является модель RNGKE, однако данная модель хуже моделирует поперечную составляющую скорости, чем $k-\omega$ -SST, что является приоритетным показателем при рассмотрении задач с крупными вихревыми структурами течения.

На основе верификации расчетной модели и обзора работ последних лет, некоторые из которых представлены в настоящей статье, принято решение для дальнейших исследований течения жидкости в трубопроводах с изгибами использовать в расчетах $k-\omega$ -SST модель турбулентности.

3. Расчетная задача

3.1. Геометрия трубопровода

Автор работы [12] отмечает, что с точки зрения действующих напряжений и числа циклов нагружения, наиболее «уязвимыми» элементами трубной системы судовых ЯЭУ являются трубопроводы системы компенсации давления. Поэтому из всех неотсекаемых трубопроводов 1-го контура с точки зрения возможности развития повреждений следует рассматривать трубопроводы системы компенсации давления.

В работе [13] приводится описание трубной системы компенсатора давления судовых ЯЭУ нового поколения, которая состоит из изогнутых трубопроводов большой длины.

В настоящей работе для исследования особенностей течения теплоносителя в каналах трубной системы компенсатора давления рассмотрена упрощенная геометрия, представляющая собой трубопровод с пятью изгибами различной направленности.

Длина прямолинейных участков трубопровода составляла от $20D$ до $40D$, а радиус кривизны изогнутых участков был равен диаметру D трубопровода. Геометрия канала для расчетной задачи показана на рис. 12.

3.2. Начальные и граничные условия задачи

Была рассмотрена нестационарная задача. Для постановки начальных и граничных условий использовался участок рабочей характеристики судовой ЯЭУ, указанный на рис. 13.

Начальные и граничные условия для расчетной задачи приведены в табл. 2.

3.3. Результаты расчета

Иллюстрации, представленные на рис. 14, 15, показывают, что в сечении изогнутого канала формируются крупномасштабные вихри с противоположной киральностью.

На рис. 14 представлено поле поперечной составляющей скорости в сечении 4-4 (см. рис. 12) в момент времени $\tau = 30$ с, т.е. в момент максимального перепада давления в трубопроводе. Двухвихревая структура течения, возникающая в данном сечении, соответствует классическому виду вихрей Дина.

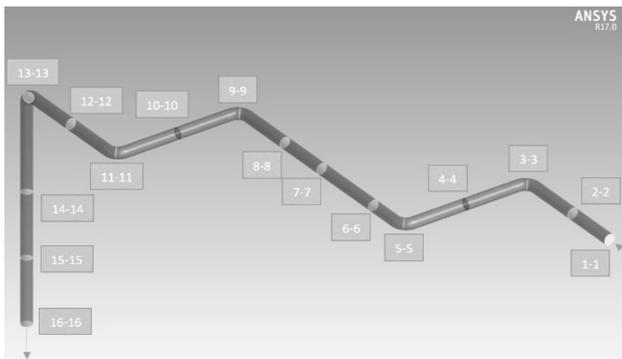


Рис. 12. Трубопровод с пятью изгибами

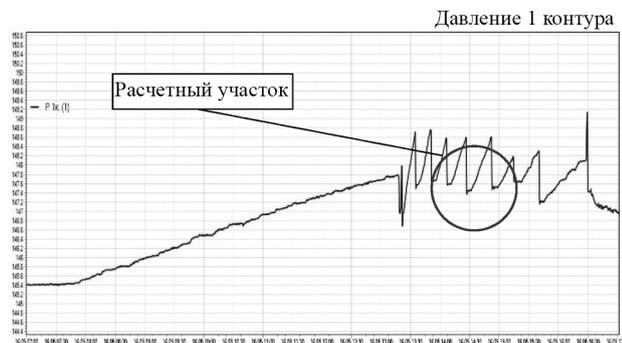


Рис. 13. Рабочая характеристика системы компенсатора давления судовой ЯЭУ

Таблица 2. Начальные и граничные условия задачи

Начальные условия	
Скорость движения теплоносителя u	0 м/с
Температура теплоносителя	300 °С
Время расчета	60 с
Шаг расчета по времени	0.05 с
Граничные условия	
На входе: давление p	$15.7 + 0.1\tau$, если $\tau < 30$ $16.0 - 0.1(\tau - 30)$, если $\tau > 30$
температура t	100 °С
На стенке: скорость \vec{u}	0 м/с
На выходе: давление p	15.7 МПа

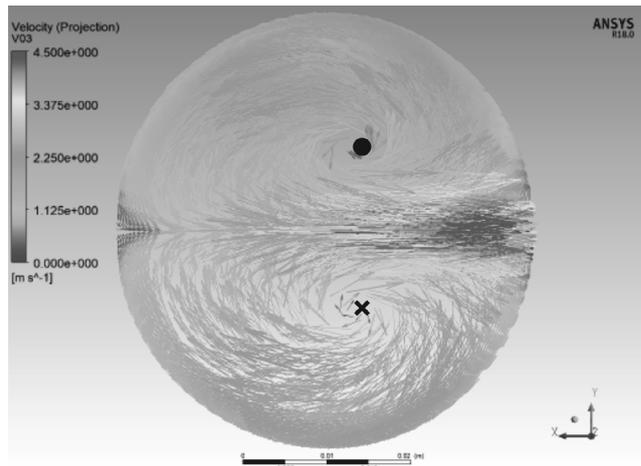


Рис. 14. Структура течения теплоносителя в сечении 4-4 ($\tau = 30$ с)

Рис. 15 показывает, что после прохождения изгибов противоположной направленности структура течения преобразуется и состоит из четырех вихрей вместо двух. Структура из четырех вихрей менее устойчива, влияние первого изгиба полностью исчезает после прохождения 7–8 калибров трубопровода, в то время как структура из двух вихрей может сохраняться на расстоянии до 20 калибров.

На рис. 14, 15 точками и крестиками обозначены центры вихреобразования с соответствующим направлением вращения (точка соответствует левовинтовому движению, а крестик – правовинтовому).

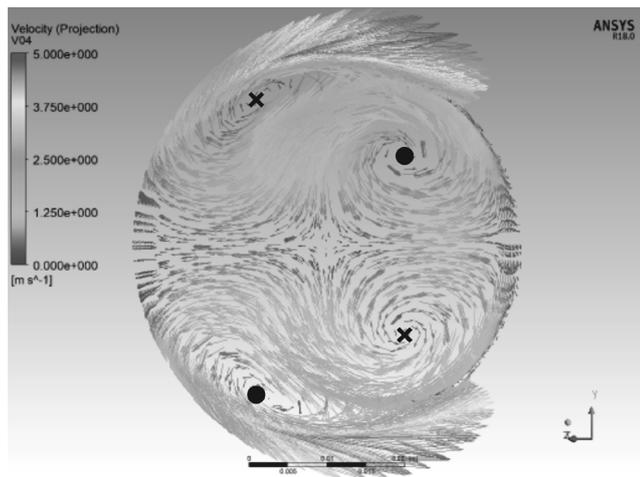


Рис. 15. Структура течения в сечении 5-5 трубопровода ($\tau = 30$ с)

Для оценки влияния кривизны канала трубопровода на структуру течения за последующими изгибами была проанализирована эволюция поля спиральности в сечении 10-10 (см. рис. 12). Контуры поля спиральности в различные моменты времени представлены на рис. 16.

В начале процесса, когда скорость потока незначительна, никаких эффектов закрутки потока не наблюдается. Далее, по мере роста перепада давления скорость потока увеличивается и в сечении 10-10 появляется структура, состоящая из двух вихрей. По мере увеличения скорости, несмотря на достаточно протяженный прямолинейный участок длиной $20D$ до поворота, начинает проявляться влияние предшествующего изгиба и уже на 10-й секунде процесса структура состоит уже из четырех вихрей.

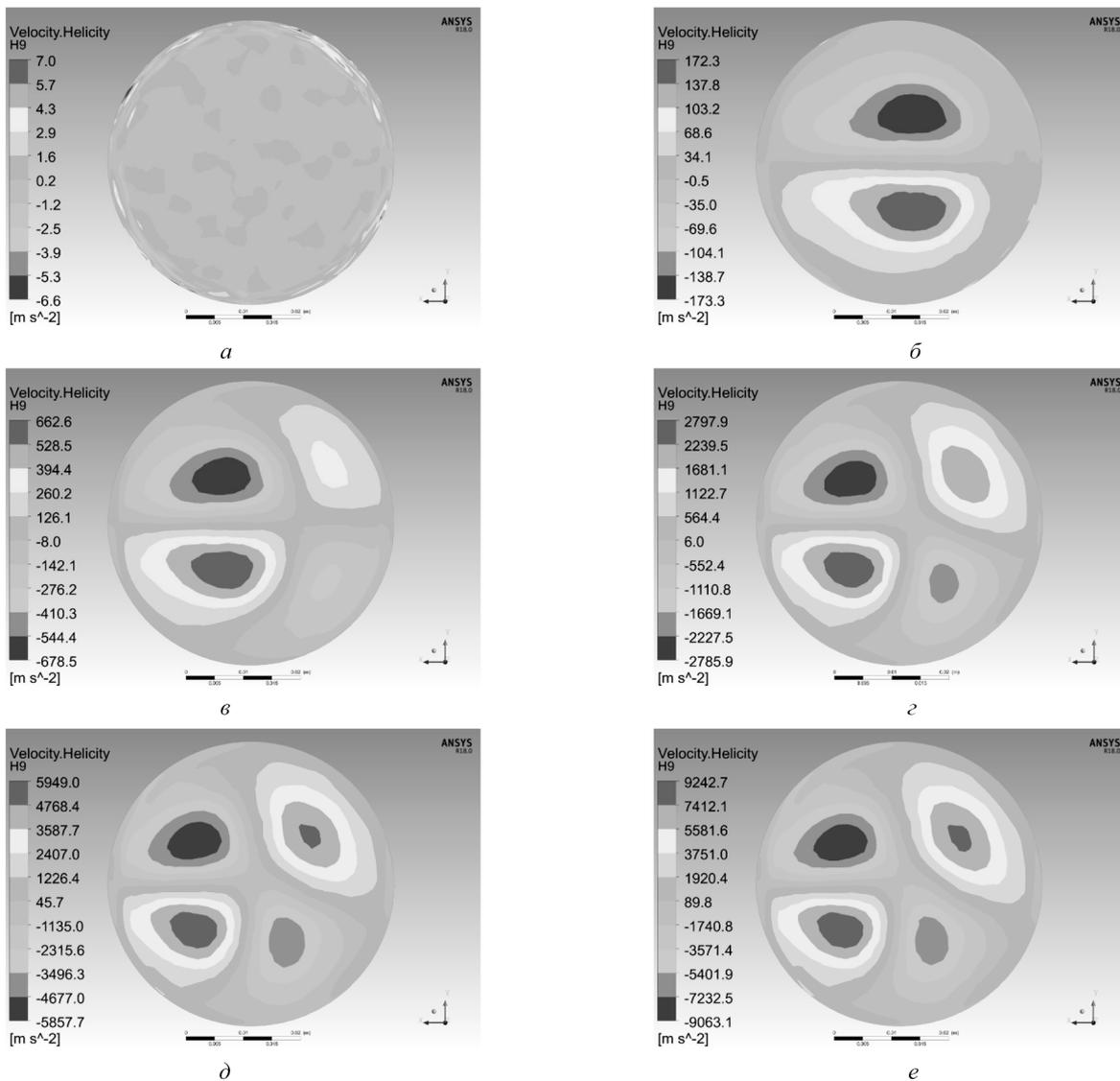


Рис. 16. Контуры поля спиральности в сечении 10-10 в моменты времени: *a* – 0.25; *b* – 1.5; *c* – 3; *d* – 10; *e* – 20; *e* – 30 с

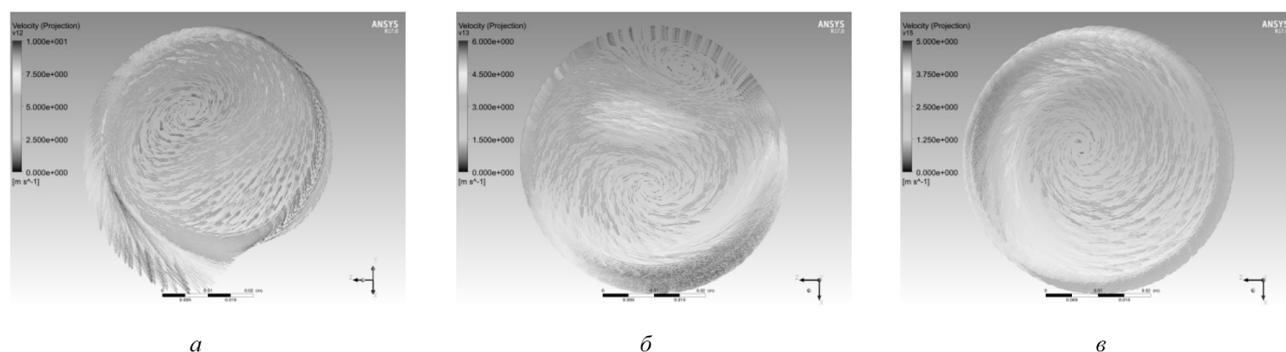


Рис. 17. Поле скоростей в поперечных сечениях 14, 15, 16 ($\tau = 30$ с)

Рис. 17 показывает, что геометрия канала играет определяющую роль в формировании вихревой структуры течения. Иллюстрации, представленные на рис. 16, 17, свидетельствуют о том, что переход потока со сложной установившейся вихревой структурой (см. рис. 16, *д*, *е*) из горизонтальной плоскости в вертикальную после изгиба в сечении 13 (см. рис. 12) приводит к трансформации вихревой структуры течения и генерации закрутки потока в масштабе всего поперечного сечения канала.

Заключение

Проведенные вычислительные эксперименты и сравнение с опытными данными показывают, что в каналах трубопроводных систем вихревая структура течения теплоносителя существенно зависит от геометрии трубопровода и последовательности гибов различной пространственной ориентации.

Рассмотренная задача позволяет сделать выводы, что в случае криволинейных трубопроводов необходимо учитывать длину релаксации потока и восстановления турбулентного профиля скорости. В случае недостаточной длины трубопровода между различными криволинейными участками необходимо рассматривать задачу интегрально, включая все особенности геометрии канала в расчетную задачу, либо задавая соответствующий профиль скорости на входе в расчетный участок.

От структуры течения во многом зависят эффекты температурной стратификации теплоносителя, вибрационные процессы, акустические колебания теплоносителя и эффекты газовыделения растворенных в теплоносителе газов [14]. Каждый из перечисленных процессов вносит свой вклад в повреждаемость и снижение надежности оборудования судовых ЯЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.
2. **Костин В.И., Панов Ю.К., Полуничев В.И., Яковлев О.А.** Результаты эксплуатации РУ атомных судов России и опыт продления их назначенного ресурса // Веб-сайт ФНЦП ФГУП «ОКБМ». 2010. URL: <http://www.okbm.nnov.ru> (дата обращения: 15.08.2017).
3. **Dean W.R.** The streamline motion of fluid in a curved pipe // *Phil. Mag.* 1928. N 30. P. 673–693.
4. **Goldstein S.** *Modern Developments in Fluid Mechanics.* Oxford University Press. 1938.
5. **Schlichting H.** *Boundary-layer Theory.* McGraw-Hill, 7th ed. 1975.
6. **Bertelsen A.F.** An experimental investigation of low Reynolds number secondary streaming effects associated with an oscillating viscous flow in curved pipe // *Journal of Fluid Mechanics*, 1975. N 70. P. 519–527.
7. **Ward-Smith A.** *Internal Fluid flow. The Fluid Dynamics of Flow in Pipes and Ducts.* Clarendon Press. 1980. 566 p.
8. **Kalpaki A.** Experimental Study of Turbulent Flows Through Pipe Bends. CCGEx & Linne Flow Centre, KTH. 2012. 127 p.
9. **Hellstrom L.H.O., Zlatinov M.B., Cao G., Smits A.J.** Turbulent pipe flow downstream of a 90° bend // *Journal of Fluid Mechanics*. October 2013. V. 735. R7. DOI:10.1017/JFM.2013.534
10. **Kim J., Yadav M., Kim S.** Characteristics of secondary flow induced by 90-degree elbow in turbulent pipe flow // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. December 2014. V. 8. N 2. P. 229–239.
11. **Sudo K., Sumida M., Hibara H.** Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend // *Experiments in Fluids*. 1998. N 25. P. 42–49.
12. **Панов Ю.К.** Обоснование выбора границ дистанционного поддержания средней температуры в реакторе из условия увеличения ресурса системы КД атомных ледоколов. Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения имени И.И. Африкантова. Нижний Новгород. Научно-технический отчет, 2000.
13. **Байрамуков А.Ш., Митрофанова О.В.** Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в переходных режимах работы судовых ядерно-энергетических установок // *Тепловые процессы в технике*. 2017. Т. 9. № 5. С. 211–216.
14. **Дядик А.Н., Сурин С.Н.** Энергетика атомных судов. СПб.: Судостроение, 2014. 477 с.

Numerical investigation on coolant fluid flow in the complex curved pipelines

O.V. Mitrofanova^{1,2}, A.S. Bayramukov²

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, Russia

² National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, 123182, Russia

e-mail: omitr@yandex.ru, bayramuks@gmail.com

Complex curved pipelines of the marine nuclear power installations cause the generation of the stable vortexes in the coolant circuits. One of the most dangerous accidents in the marine nuclear power installations is a burst of the pressurizer's pipe. Problem of the hydrodynamics of coolant fluid flows features through curved pipelines have to be investigated due to the frequency load of the pressurizer. This investigation is a basis to increase safety operation life of the nuclear power installations. Simplified geometric model including typical structural parts was chosen to study the problem. Verification of the computational model was based on the qualitative and quantitative analysis of the various turbulent models. The most appropriate model has been selected. The initial and boundary conditions were chosen from operation data of the marine nuclear power installation pressurizer's system. As a result of numerical investigation, velocity and helicity fields in the cross sections of the pipeline were obtained. The features and regularities of the fluid flow and transformation of vortex structures, which occurs after bends in the different directions and their combinations are revealed. The analysis will be the main information for the further research of the pressurizer's pipe system reliability and durability problems of ship nuclear power installations.

Keywords: hydrodynamics, vortex structures, fluid flow swirl, nuclear power facilities, safety, computation fluid dynamics, pressurizer, pipe system.

REFERENCES

1. **Mitrofanova O.V.** *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno-energeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamics and heat exchange of the vortex fluid flow in the nuclear power plant circuits]. Moscow: FIZMATLIT, 2010. 288 p. In Russ.
2. **Kostin V.I., Panov Y.K., Polunichev V.I., Yakovlev O.A.** *Rezultaty ekspluatatsii RU atomnykh sudov Rossii i opyt prodleniya ikh naznachennogo resursa* [The results of Russian marine nuclear reactors operation and experience of the operation life expanding]. Available at: <http://www.okbm.nnov.ru> (accessed 15.08.2017). In Russ.
3. **Dean W.R.** The streamline motion of fluid in a curved pipe. *Phil. Mag.*, 1928, no. 30. pp. 673–693.
4. **Goldstein S.** *Modern Developments in Fluid Mechanics*. Oxford University Press, 1938.
5. **Schlichting H.** *Boundary-layer Theory*. McGraw-Hill, 1955.
6. **Bertelsen A.F.** An experimental investigation of low Reynolds number secondary streaming effects associated with an oscillating viscous flow in curved pipe. *Journal of fluid Mechanics*, 1975, no. 70, pp. 519–527.
7. **Ward-Smith A.** *Internal Fluid flow. The Fluid Dynamics of Flow in Pipes and Ducts*. Clarendon Press. 1980. 566 p.
8. **Kalpakli A.** *Experimental study of Turbulent Flows Through Pipe Bends*. CCGEx & Linne Flow Centre, KTH Mechanics, Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm, Sweden, 2012. 127 p.
9. **Hellstrom L.H.O., Zlatinov M.B., Cao G., Smits A.J.** Turbulent pipe flow downstream of a 90° bend. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, vol. 735, R7. DOI:10.1017/JFM.2013.534
10. **Kim J., Yadav M., Kim S.** Characteristics of secondary flow induced by 90-degree elbow in turbulent pipe flow. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 229–239.
11. **Sudo K., Sumida M., Hibara H.** Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend. *Experiments in Fluids*, 1998, no. 25, pp. 42–49.
12. **Panov Y.K.** *Obosnovanie vybora granits distantsionnogo podderzhaniya srednej temperatury v reaktore iz usloviya uvelicheniya resursa sistemy KD atomnykh ledokolov* [Rationale of the average temperature selection in the icebreaker's nuclear power installation in order to increase operation life of the pressurizer's pipe system]. OKBM Afrikantov. Nizhny Novgorod. Technical report, 2000. In Russ.
13. **Bayramukov A.S., Mitrofanova O.V.** Modelirovanie protsessov gidrodinamiki i teploobmena v perekhodnykh rezhimakh raboty sudovykh yaderno-energeticheskikh ustanovok [Hydrodynamics and heat transfer simulations of marine nuclear power installations in transient modes]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2017, no. 5, pp. 211–216. In Russ.
14. **Dyadik A.N., Surin S.N.** *Energetika atomnykh sudov* [Marine nuclear power engineering]. St.Peterburg: Sudostroyeniye, 2014. 477 p. In Russ.